

www.cmm.pt



Curso de Formação:

Dimensionamento Sísmico de Estruturas Metálicas

Lisboa, 25 e 26 de Março de 2011



Rita Bento



www.cmm.pt



SUMÁRIO - MÉTODOS AVANÇADOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO SÍSMICO

- ☐ **INTRODUÇÃO ÀS METODOLOGIAS DE ANÁLISE ESTÁTICA NÃO-LINEAR ('PUSHOVER') E DINÂMICA NÃO LINEAR ('TIME-HISTORY')**
- ☐ **VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ANÁLISE ESTÁTICA NÃO LINEAR NA AVALIAÇÃO SÍSMICA DE ESTRUTURAS**
- ☐ **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SÍSMICO COM BASE NO MÉTODO N2 PROPOSTO NO EC8**
- ☐ **EXEMPLO DE APLICAÇÃO**



www.cmm.pt



INTRODUÇÃO

Análises Elásticas-Lineares

- Análises Estáticas Equivalentes
- Análises Dinâmicas Modais, por Espectros de Resposta

Análises Não-Lineares

- Análises Estáticas Não-Lineares
- Análises Dinâmicas Não-Lineares

**Regulamentos
Sísmicos**



www.cmm.pt



INTRODUÇÃO

- ❑ Nos últimos anos generalizou-se a ideia que um bom comportamento sísmico seria garantido com maior sucesso se fosse controlado o nível de deslocamentos, local e global, da estrutura.
- ❑ Novos processos de dimensionamento sísmico começaram a ser propostos por diversos autores: **Análises Estáticas Não Lineares** com controle de deslocamentos ('Pushover') e Dimensionamento Sísmico por controle de deslocamentos ('Displacement Based Design')
- ❑ **Análises dinâmicas não lineares** são consideradas as melhores, conhecendo-se no entanto as maiores desvantagens: complexas e não apropriadas para o dimensionamento prático de estruturas.

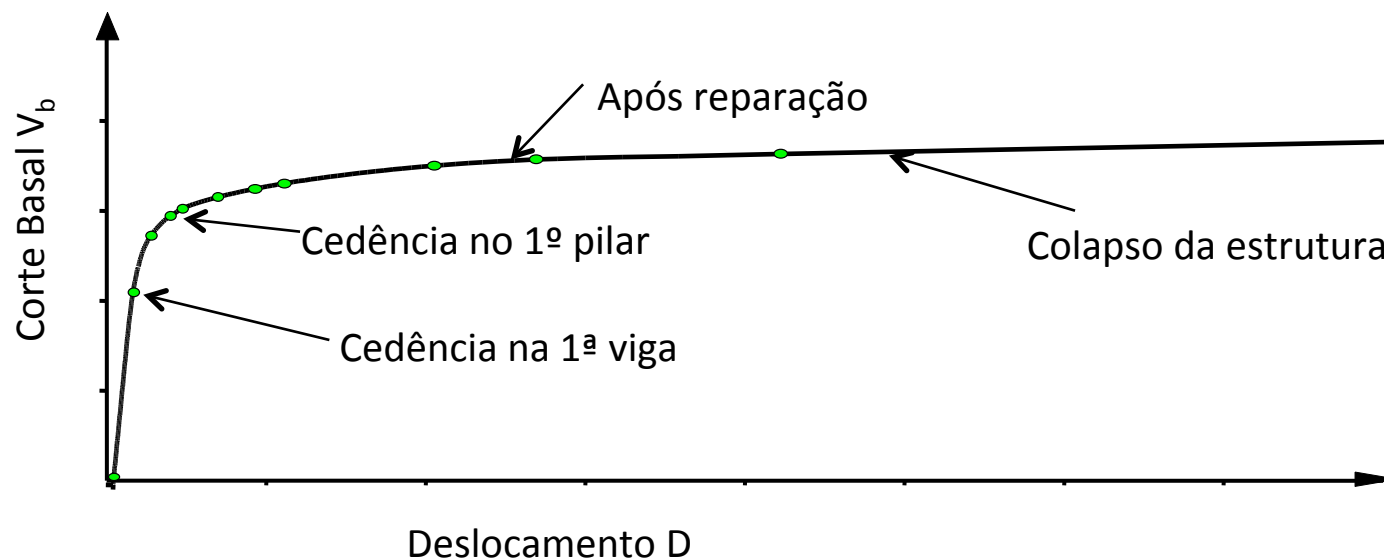


www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento fisicamente não linear da estrutura.
- ❑ Relaciona a resposta global da estrutura com uma estrutura equivalente de 1 GDL.
- ❑ Traça sequencialmente a cedência e colapso dos elementos, assim como a capacidade global da estrutura; i.e. permitem conhecer a evolução dos danos.





www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

- ☐ Considera o comportamento fisicamente não linear da estrutura.
- ☐ Relaciona a resposta global da estrutura com uma estrutura equivalente de 1 GDL.
- ☐ Traça sequencialmente a cedência e colapso dos elementos, assim como a capacidade global da estrutura.
- ☐ Permite a avaliação adequada do desempenho sísmico para diferentes estados limites.
- ☐ Estes procedimentos começam a ser propostos nos regulamentos sísmicos (EC8) para avaliação e dimensionamento de estruturas.



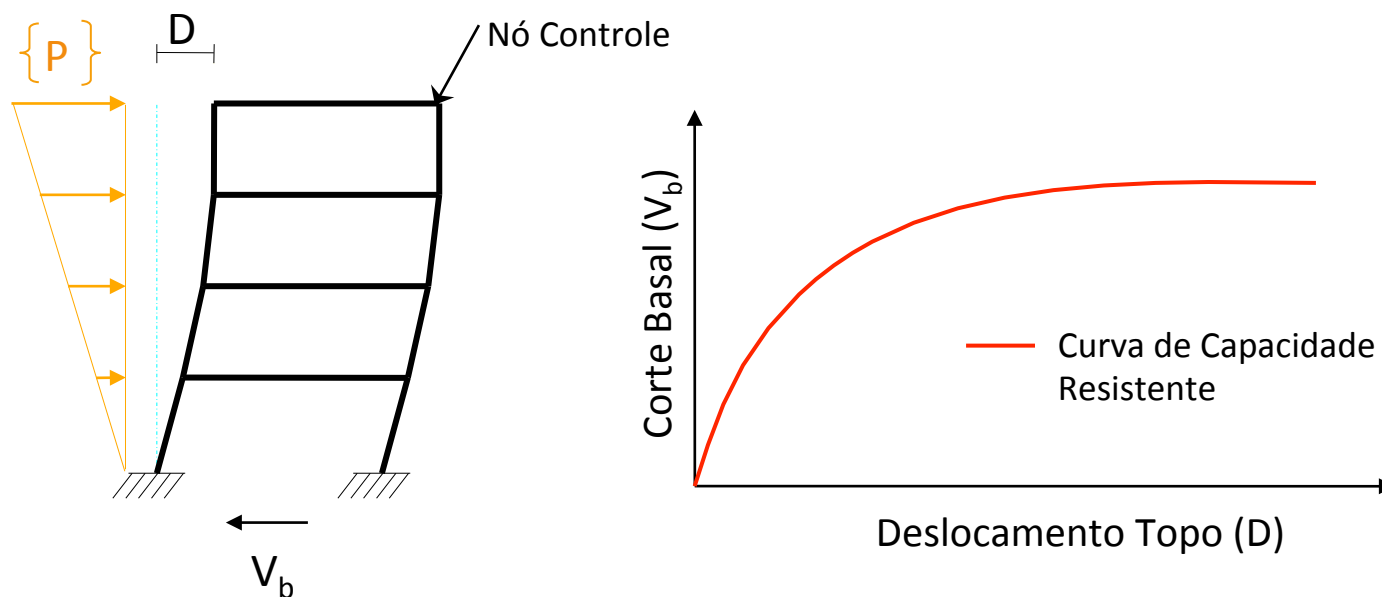
www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

Fases Principais do Processo de Cálculo:

1. Definição da capacidade resistente estrutural, aplicando incrementalmente cargas ou deslocamentos



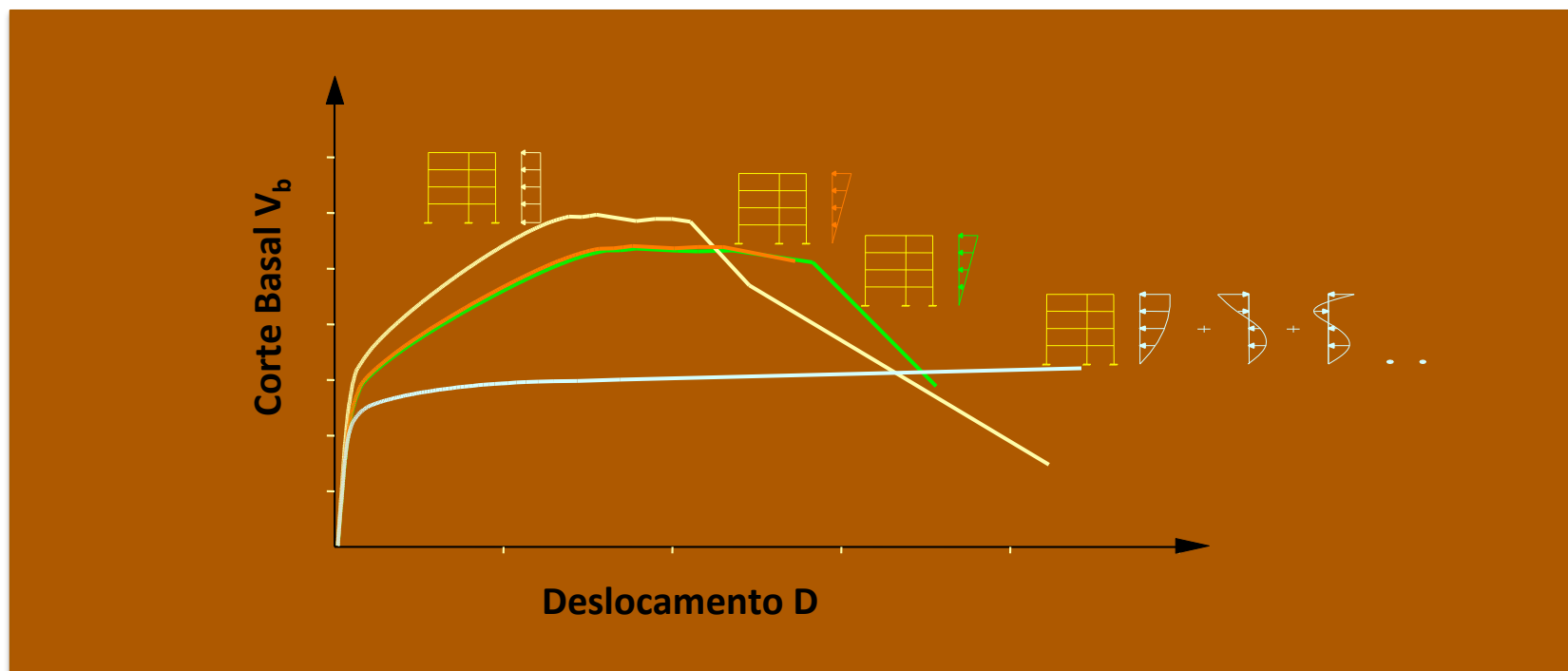


www.cmm.pt



ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

- ❑ Diferentes níveis de sofisticação podem ser usados, relativamente à distribuição de forças a utilizar.





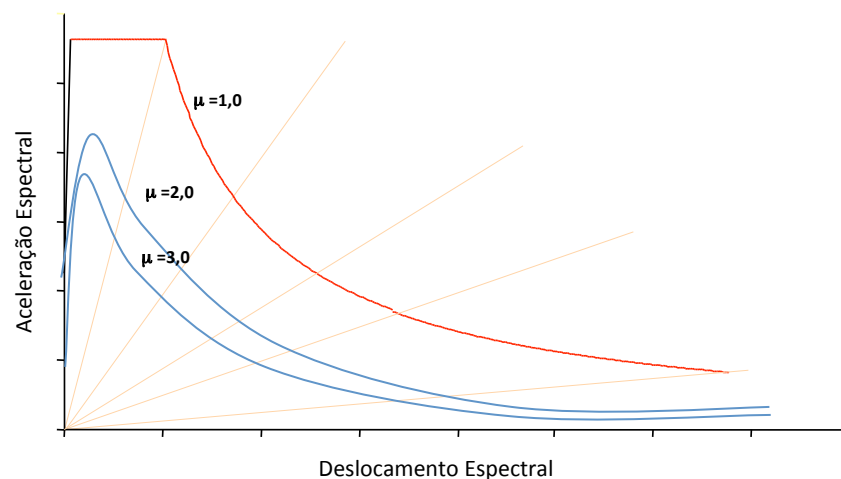
www.cmm.pt



INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

Fases Principais do Processo de Cálculo:

1. Definição da capacidade resistente estrutural, aplicando incrementalmente cargas ou deslocamentos
2. Definição da acção sísmica em termos de acelerações espectrais S_a e deslocamentos espectrais S_d , atendendo ao comportamento não linear da estrutura

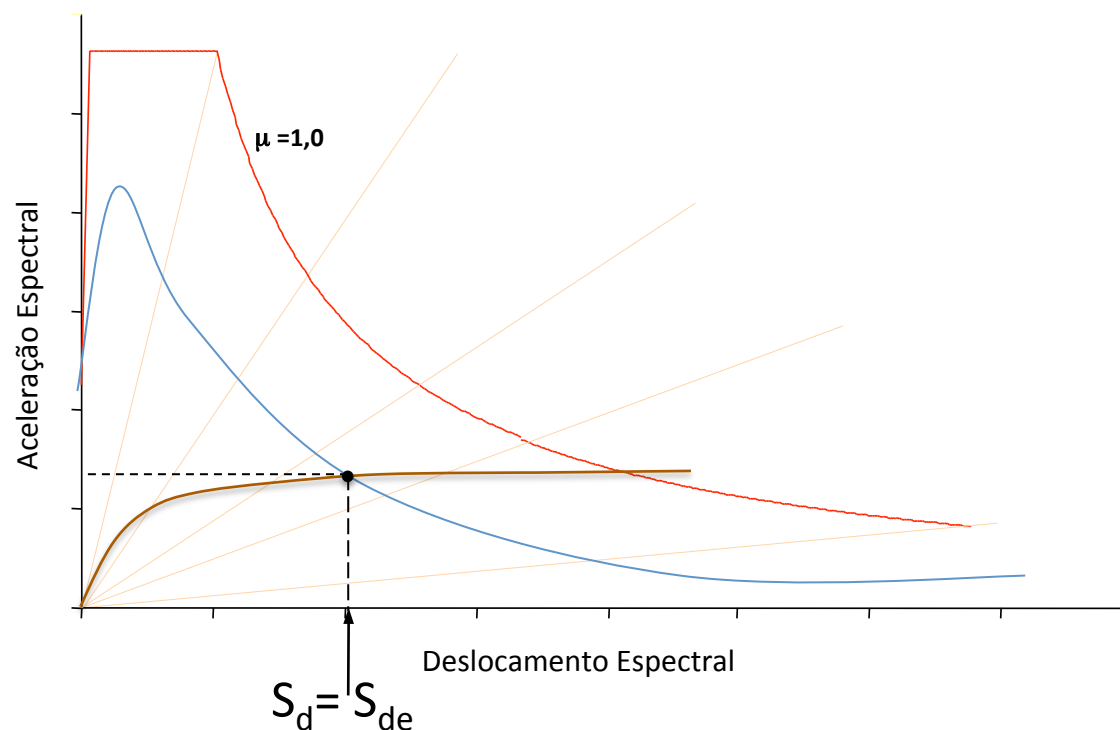




INTRODUÇÃO - ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES

Fases Principais do Processo de Cálculo:

3. Cálculo do ponto de desempenho ('performance point') ou do deslocamento sísmico ('target displacement')



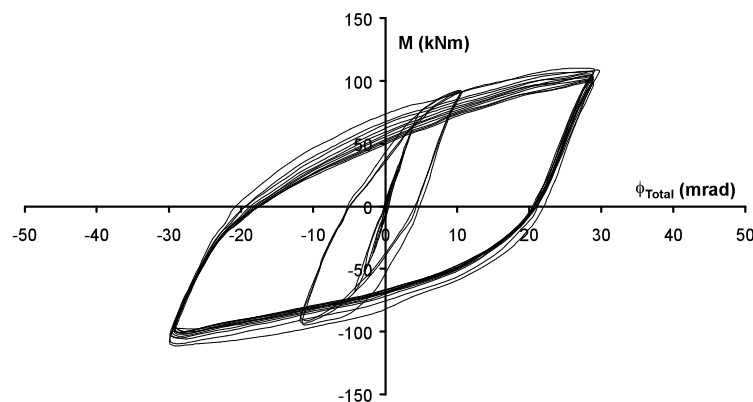


www.cmm.pt

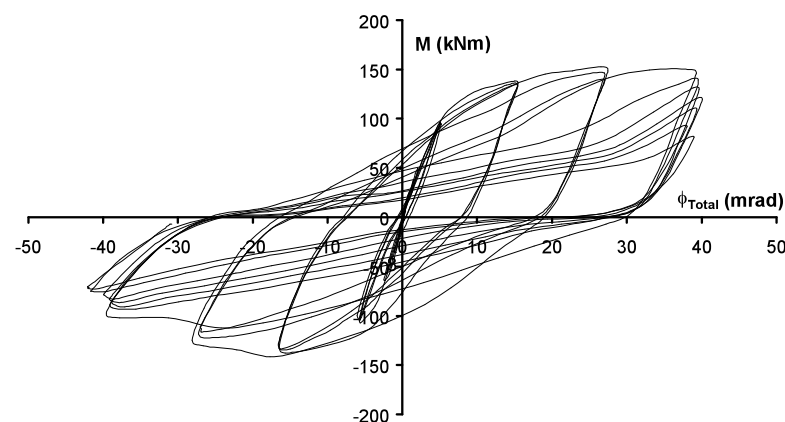


INTRODUÇÃO – ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento dinâmico fisicamente não linear da estrutura.



Curva **histerética** de uma ligação metálica
sem deslizamento

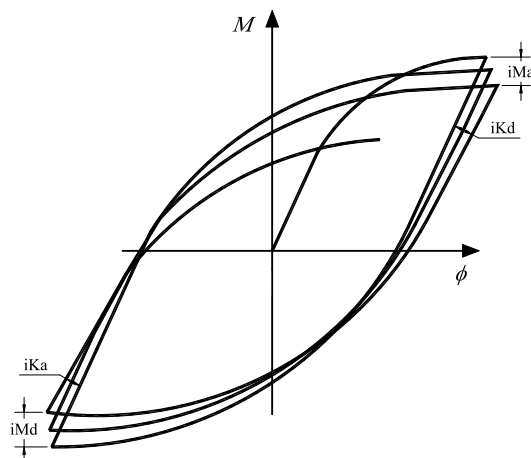


Curva **histerética** de uma ligação metálica
com deslizamento

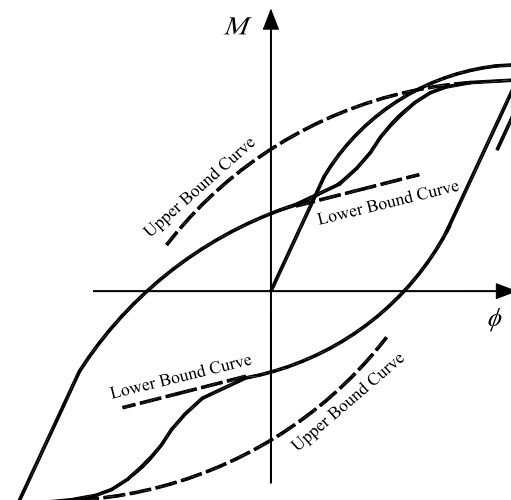


INTRODUÇÃO – ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento dinâmico fisicamente não linear da estrutura.



Modelo Richard-Abbott **sem** 'pinching'



Modelo Richard-Abbott **com** 'pinching'



www.cmm.pt

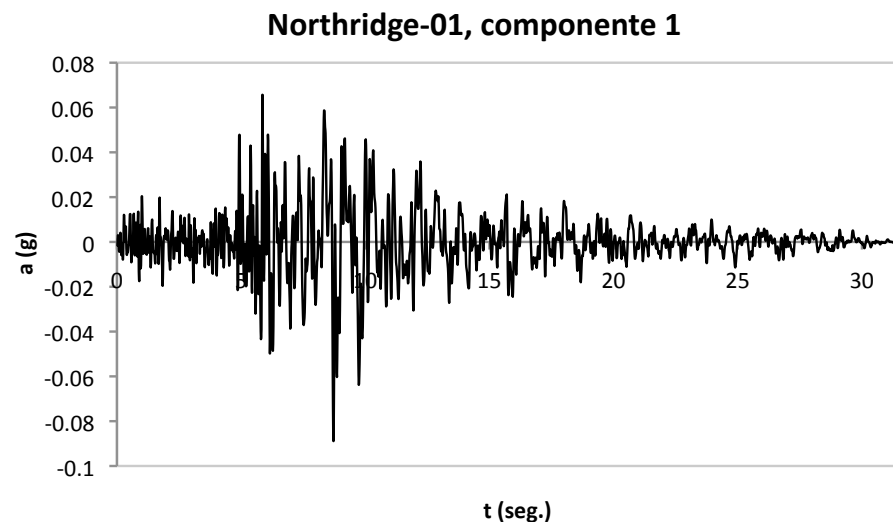


INTRODUÇÃO – ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES

- ❑ Considera o comportamento dinâmico fisicamente não linear da estrutura.
- ❑ Resolve a equação de equilíbrio dinâmico a partir de métodos de integração numérica - integração directa da equação (passo-a-passo):

$$M \ddot{U} + C \dot{U} + K U = P(t) = M \ddot{U}_{\text{solo}}(t)$$

- ❑ A acção sísmica é definida a partir de acelerogramas:





www.cmm.pt



ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES - VANTAGENS

- ❑ A avaliação/dimensionamento sísmico é baseado no controle de deslocamentos, global ou local
- ❑ Evita a utilização de um coeficiente de comportamento
- ❑ Boas estimativas da resposta sísmica para estruturas que vibram principalmente num modo
- ❑ Fornece informação sobre as características da estrutura, que não se obtêm em análises elásticas:
 - Permite definir a ductilidade da estrutura
 - Identifica as regiões críticas da estrutura, que exigem um dimensionamento mais pormenorizado ou, para estruturas existentes, um reforço adequado
 - Avalia a resistência da estrutura e identifica as descontinuidades de resistência em planta e altura.....



www.cmm.pt



ANÁLISES ESTÁTICAS NÃO LINEARES – LIMITAÇÕES DOS MÉTODOS CONVENCIONAIS

- ☐ Mais adequada para estruturas baixas e com frequências elevadas
- ☐ Admite que a deformada da estrutura não varia ao longo do tempo (regulamentos sugerem a utilização de mais do que uma distribuição de forças lateral – EC8)
- ☐ Os métodos regulamentares/convencionais têm dificuldade de modelar adequadamente as deformações quando os modos de vibração mais elevados são importantes e/ou a estrutura entra em regime significativamente não linear
- ☐ Sendo uma análise estática despreza a dissipação de energia associada com a resposta dinâmica: energia cinética, amortecimento viscoso e os efeitos de duração
- ☐ Dificuldade de reproduzir efeitos dinâmicos particulares, de incorporar efeitos 3D e efeitos do carregamento cíclico do sismo



www.cmm.pt



ANÁLISES DINÂMICAS NÃO LINEARES – VANTAGENS E LIMITAÇÕES

VANTAGENS

- ☐ Estes métodos são os únicos capazes de considerar a variação da rigidez e do amortecimento ao longo do tempo, atendendo ao comportamento fisicamente não linear dos materiais/estrutura
- ☐ Modelam o comportamento não linear das estruturas de forma adequada – os resultados obtidos são considerados os de referência

LIMITAÇÕES

- ☐ Maior complexidade e exigem um esforço computacional elevado
- ☐ Dificuldades associadas à caracterização adequada da acção sísmica
- ☐ Dispersão de resultados, resultantes do comportamento não linear => utilizar diferentes acelerogramas => realizar diferentes análises no domínio do tempo



www.cmm.pt



AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO SÍSMICO COM BASE NO MÉTODO N2 PROPOSTO NO EC8

N - 2

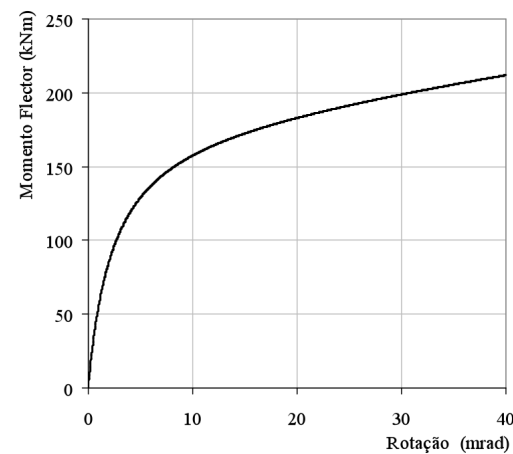
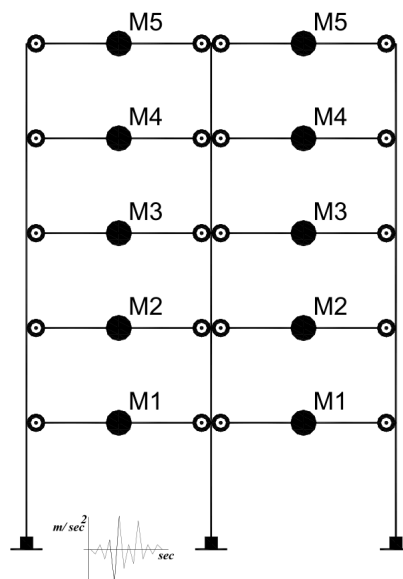


www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

1. Modelação da estrutura atendendo ao **comportamento não linear** de todos os seus elementos estruturais





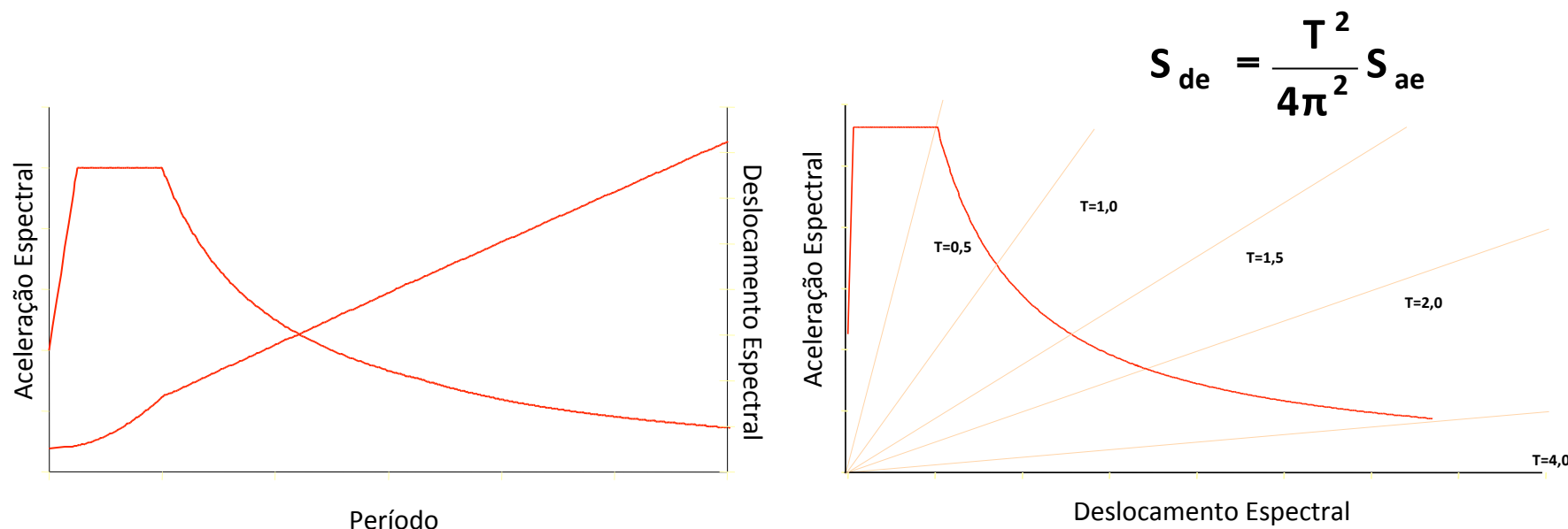
www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

1. Modelação da estrutura atendendo ao **comportamento não linear** de todos os seus elementos estruturais
2. Definição da Acção Sísmica

2.1 Determina-se o Espectro Elástico no formato ADRS





www.cmm.pt

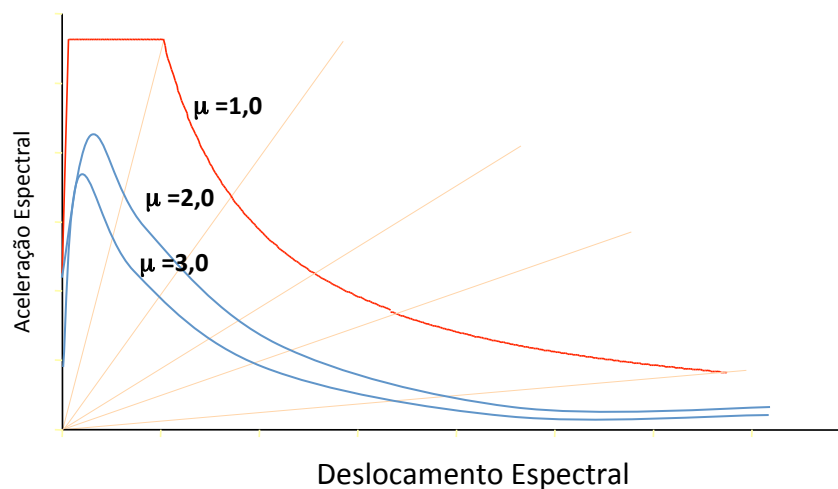


MÉTODO N2 - Passos

1. Modelação da estrutura atendendo ao **comportamento não linear** de todos os seus elementos estruturais
2. Definição da Acção Sísmica

2.1 Determina-se o Espectro Elástico no formato ADRS

2.2 Determina-se o Espectro Inelástico no formato ADRS



$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad S_d = \mu S_{dy}$$

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_c} + 1 \quad T < T_c$$

$$R_\mu = \mu \quad T \geq T_c$$

$$S_d = \mu \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$$



MÉTODO N2 - Passos

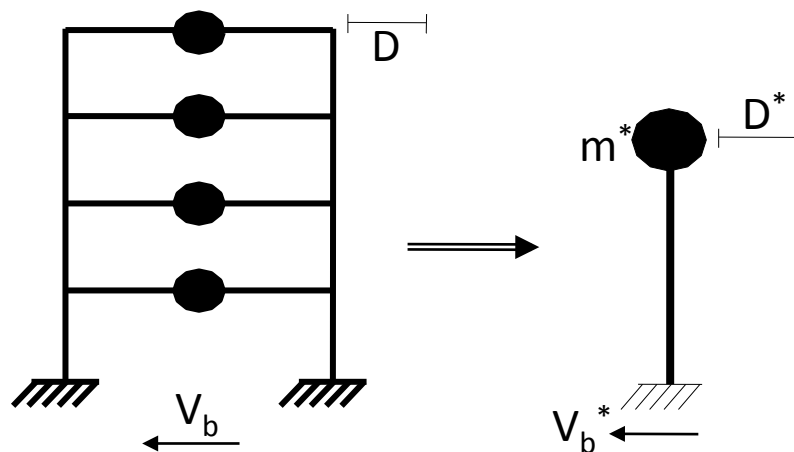
3. Recorre-se à **Análise Pushover** e define-se a **Curva de Capacidade Resistente**

3.1 Assume-se a forma da deformada $\{\phi\}$

3.2 Determina-se a distribuição vertical das forças laterais $\{p\} = p \{M\} \{\phi\}$

3.3 Define-se a curva $V_b - D$, aumentando monotonicamente uma distribuição de forças lateral (a intensidade do carregamento é controlada pelo factor p)

4. Definição do sistema de **1GL** equivalente



$$m^* = \sum m_i \phi_i$$

$$V_b^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad \Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2}$$

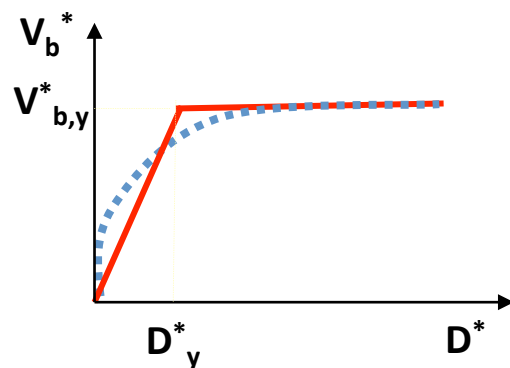
$$D^* = \frac{D}{\Gamma}$$



MÉTODO N2 - Passos

4. Definição do sistema de **1GL** equivalente

- Definir uma relação aproximada Força – Deslocamento elasto-plástica e determinar $V_{b,y}^*$ e D_y^* e T^*



$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{V_{b,y}^*}}$$

- Determinar o diagrama de capacidade (Aceleração vs Deslocamento)

$$S_a = \frac{V_b^*}{m^*}$$



MÉTODO N2 - Passos

5. Desempenho sísmico do sistema **1GL**

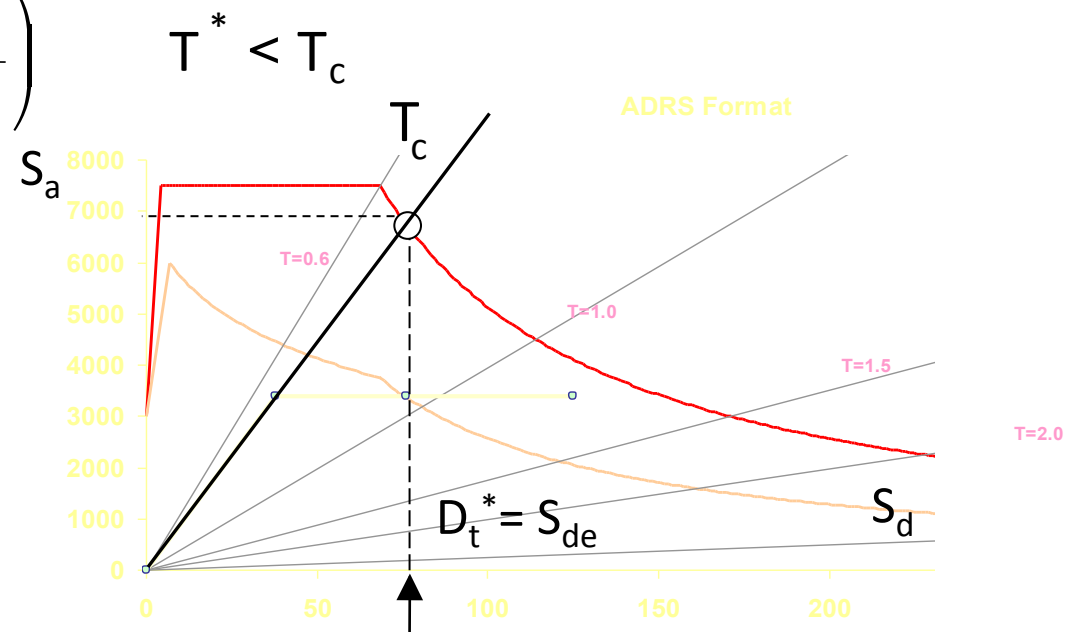
- Determinar o factor de redução R_μ

$$R_\mu = \frac{S_{ae}}{S_{ay}}$$

- Determinar o deslocamento $D_t^* = S_d$

$$D_t^* = \frac{S_{de}}{R_\mu} \left(1 + (R_\mu - 1) \frac{T_c}{T^*} \right)$$

$$D_t^* = S_{de} \quad T^* > T_c$$





www.cmm.pt



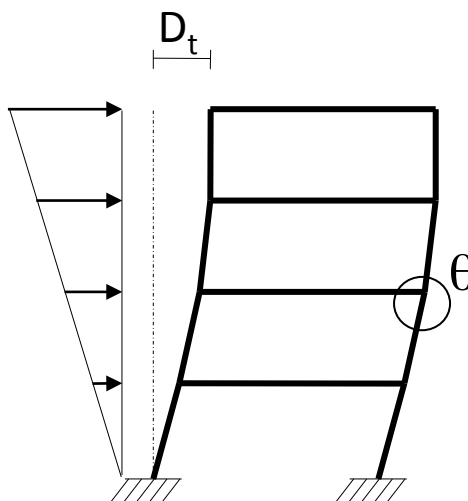
MÉTODO N2 - Passos

6. Desempenho sísmico do sistema **nGL**

- Cálculo do deslocamento de topo da estrutura de **nGL**

$$D_t = \Gamma D_t^*$$

- Recorrer a uma análise estática, aumentando monotonicamente as cargas, até atingir D_t (ou um múltiplo deste)
- Cálculo de quantidades locais, como rotações θ , deslocamentos relativos....





www.cmm.pt



MÉTODO N2 - Passos

6. Desempenho sísmico do sistema **nGL**

- Cálculo do deslocamento de topo da estrutura de **nGL**
$$D_t = \Gamma S_d$$
- Recorrer a uma análise estática, aumentando monotonicamente as cargas, até atingir D_t (ou um múltiplo deste) relativos....
- Cálculo de quantidades locais, como rotações θ , deslocamentos relativos....

7. O desempenho sísmico estrutural, correspondente ao deslocamento D_t (ou um múltiplo deste), é comparado com os valores resistentes propostos



www.cmm.pt



N2 – LIMITAÇÕES adicionais

- ❑ **A regra de ‘deslocamentos iguais’** (elástico e inelástico) é adequada para estruturas com o período fundamental médio e longo e solos firmes, com ciclos histeréticos relativamente estáveis – valores de deslocamentos inelásticos ligeiramente conservativos
- ❑ **A regra de ‘deslocamentos iguais’** conduz a deslocamentos inelásticos muito pequenos quando a estrutura está sujeita a sismos próximos, os ciclos histeréticos são caracterizados pelo efeito de aperto (‘pinching’) ou por significativa degradação de resistência e de rigidez
- ❑ **A regra de ‘deslocamentos iguais’** não é adequada para solos moles – nestes casos um espectro inelástico modificado deve ser usado ou, alternativamente, usar factor correctivos para o cálculo de deslocamentos



www.cmm.pt



MÉTODO N2 – Extensão para edifícios assimétricos

6. Desempenho sísmico do sistema **nGL**

- Cálculo do deslocamento de topo da estrutura de **nGL**

$$D_t = \Gamma S_d$$

- Recorrer a uma análise estática, aumentando monotonicamente as cargas, até atingir D_t (ou um múltiplo deste), para cada uma das direcções separadamente

7. Determinação dos efeitos de Torção

- Análise dinâmica linear por espectros de resposta, para cada direcção isoladamente e depois combinar resultados SRSS
- Factores de correcção (≥ 1) a usar em todos os resultados relevantes – razão entre os deslocamentos normalizados (deslocamento no topo do edifício/ deslocamento CM) determinados pela análise dinâmica linear e pela análise *Pushover*.

8. O desempenho sísmico estrutural final



www.cmm.pt



MÉTODO N2 – Extensão – consideração dos modos de vibração superiores (14ECEE)

1. Método N2 corrente (EC8)
2. Análise dinâmica linear por espectros de resposta considerando todos os modos de vibração relevantes. Determinação de deslocamentos relativos entre pisos. Normalizar os resultados para que o deslocamento do topo = deslocamento de topo da estrutura (D_t)
3. Para cada piso determinar factor de correcção $c_{HM} (\geq 1) = \text{Deslocamentos passo 2} / \text{deslocamentos passo 1}$ (importantes para os deslocamentos relativos)
4. Deslocamentos finais = deslocamentos passo 1 $\times c_{HM}$
5. As deformações locais e esforços são determinados a partir dos deslocamentos relativos definidos em 4.

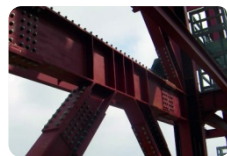
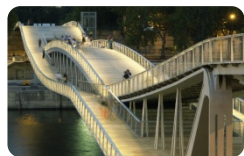


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

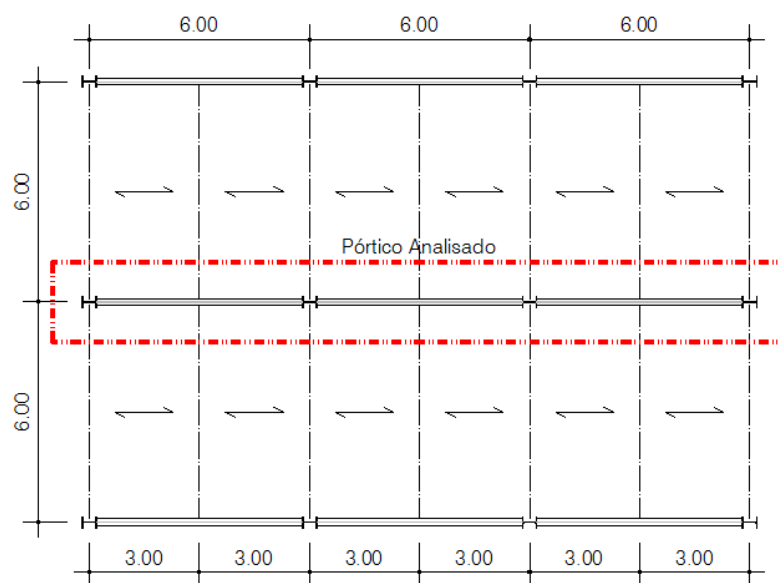
Pórtico Metálico de Ligações Rígidas



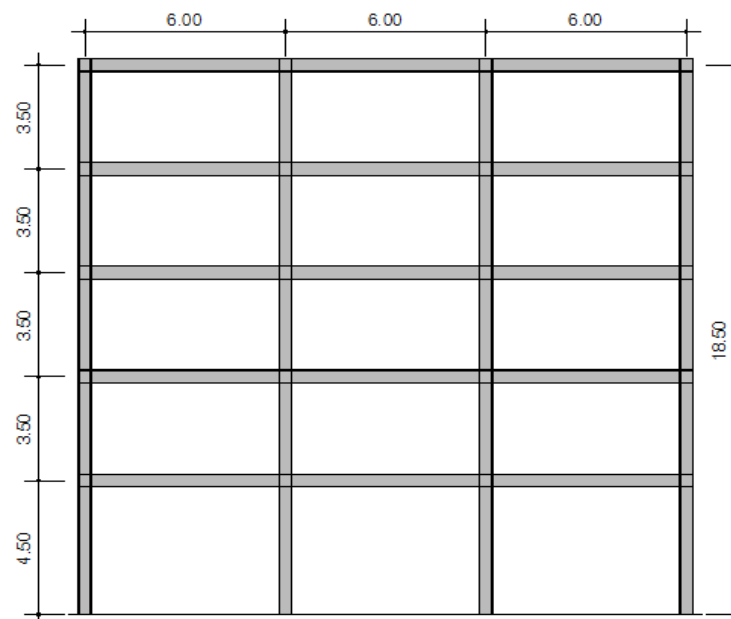
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO



Planta da Estrutura Metálica



Pórtico Analisado



www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

- ☐ As análises foram efectuadas no **OpenSees v2.2**
- ☐ Elementos de fibras (2 elementos por viga e 1 por pilar) com uma formulação em forças (7 pontos de Gauss)
- ☐ Ligações rígidas entre as vigas e os pilares. Comportamento não-linear ao nível destes elementos.
- ☐ Modelação do material: modelo elasto-plástico bi-linear com 1% de endurecimento

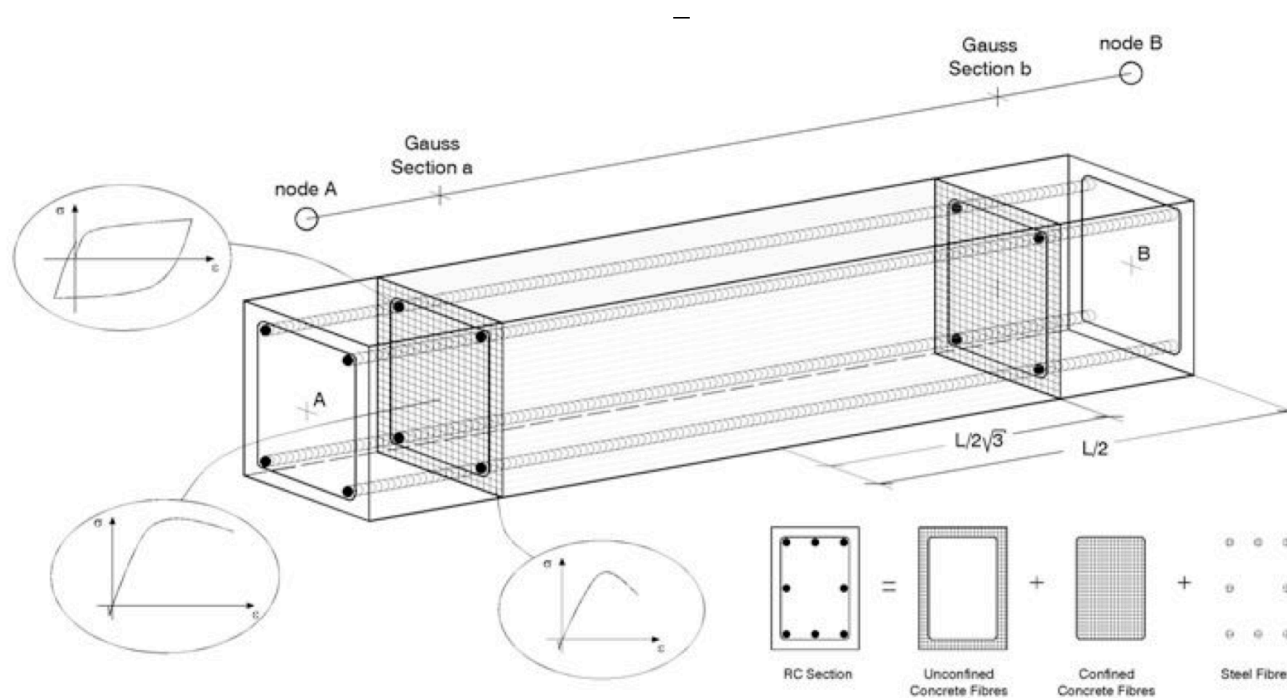


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA





www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

1. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

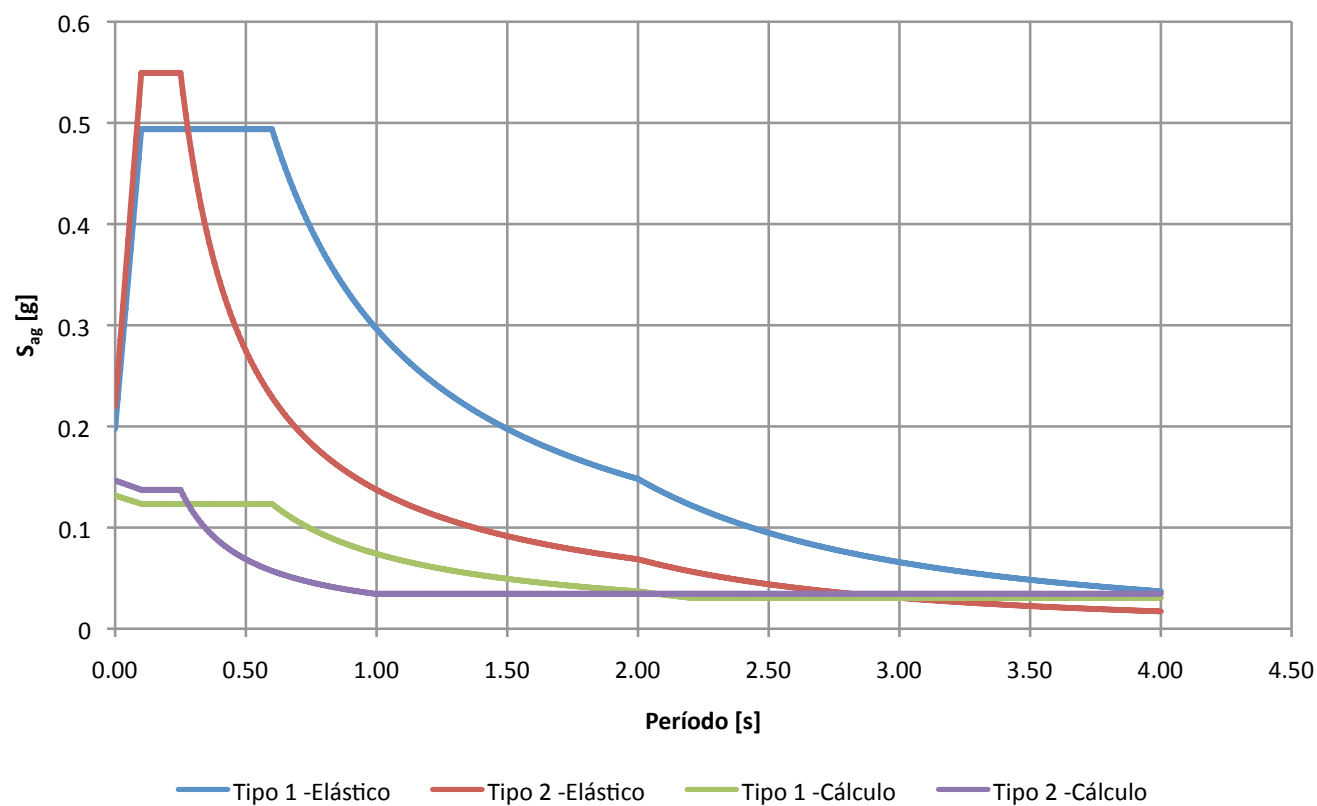
- ☐ No OpenSees as secções metálicas não estão discretizadas com as zonas arredondadas entre a alma e os banzos
- ☐ As secções extremas das vigas são modeladas com uma rigidez de flexão igual a 95% da rigidez real
- ☐ => Redução do M_{pl} em $\pm 5\%$



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

2. DEFINIÇÃO DA ACÇÃO SÍSMICA - Espectros Elástico e de Cálculo (0,15g)

Espectros de Resposta



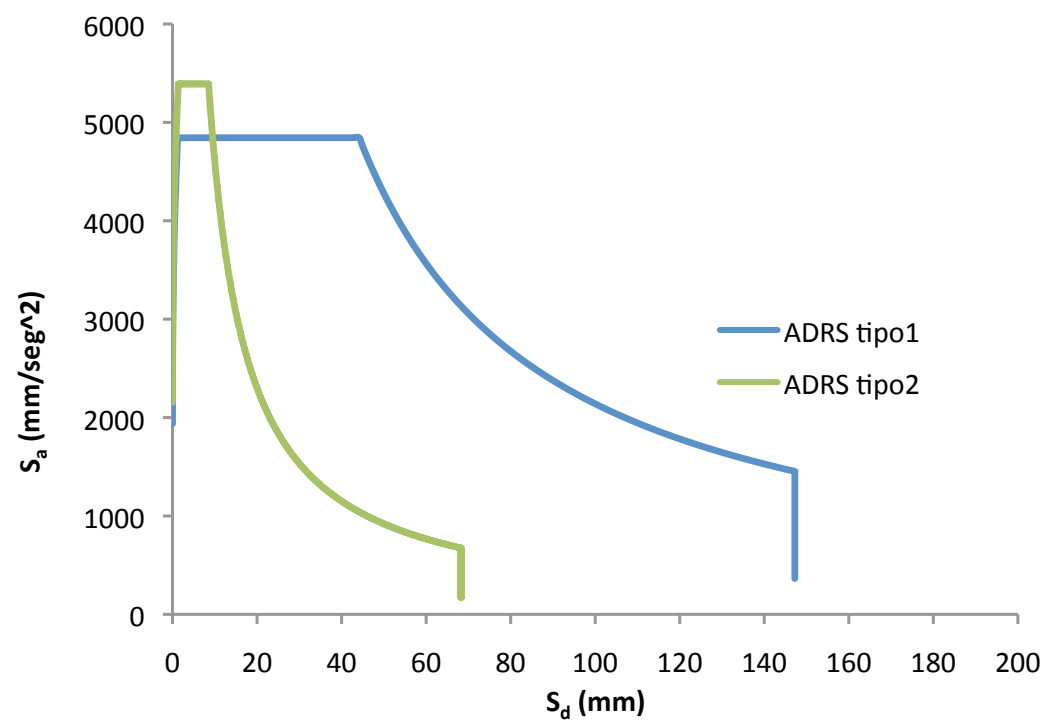


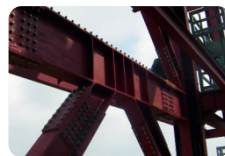
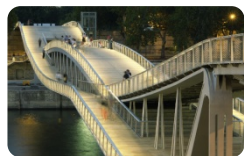
www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

2. DEFINIÇÃO DA ACÇÃO SÍSMICA – Espectro elástico no formato ADRS



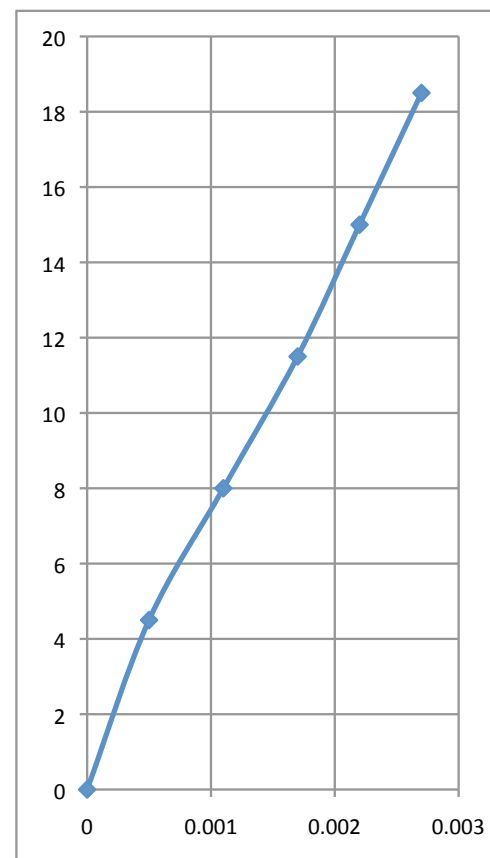


EXEMPLO DE APLICAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

1º Modo de Vibração ϕ

h_i (m)	ϕ
0	0
4.5	0.0005
8	0.0011
11.5	0.0017
15	0.0022
18.5	0.0027



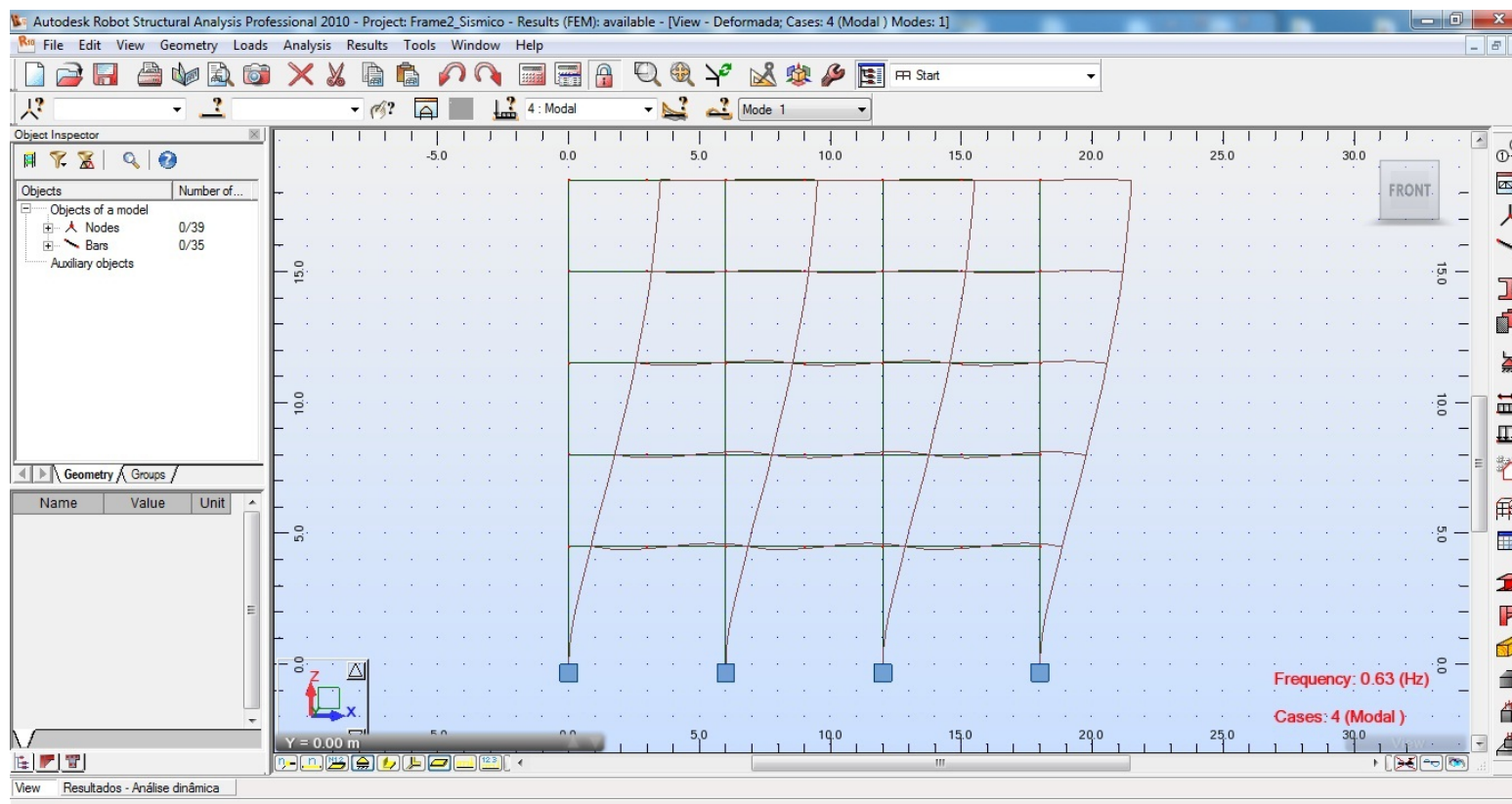


www.cmm.pt

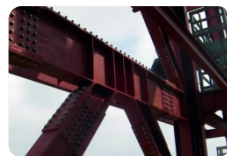
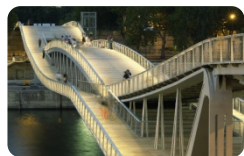


EXEMPLO DE APLICAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA – Estrutura Inicial



Solução resultante das combinações gravíticas - estrutura não cumpre o critério dos efeitos $P-\Delta$

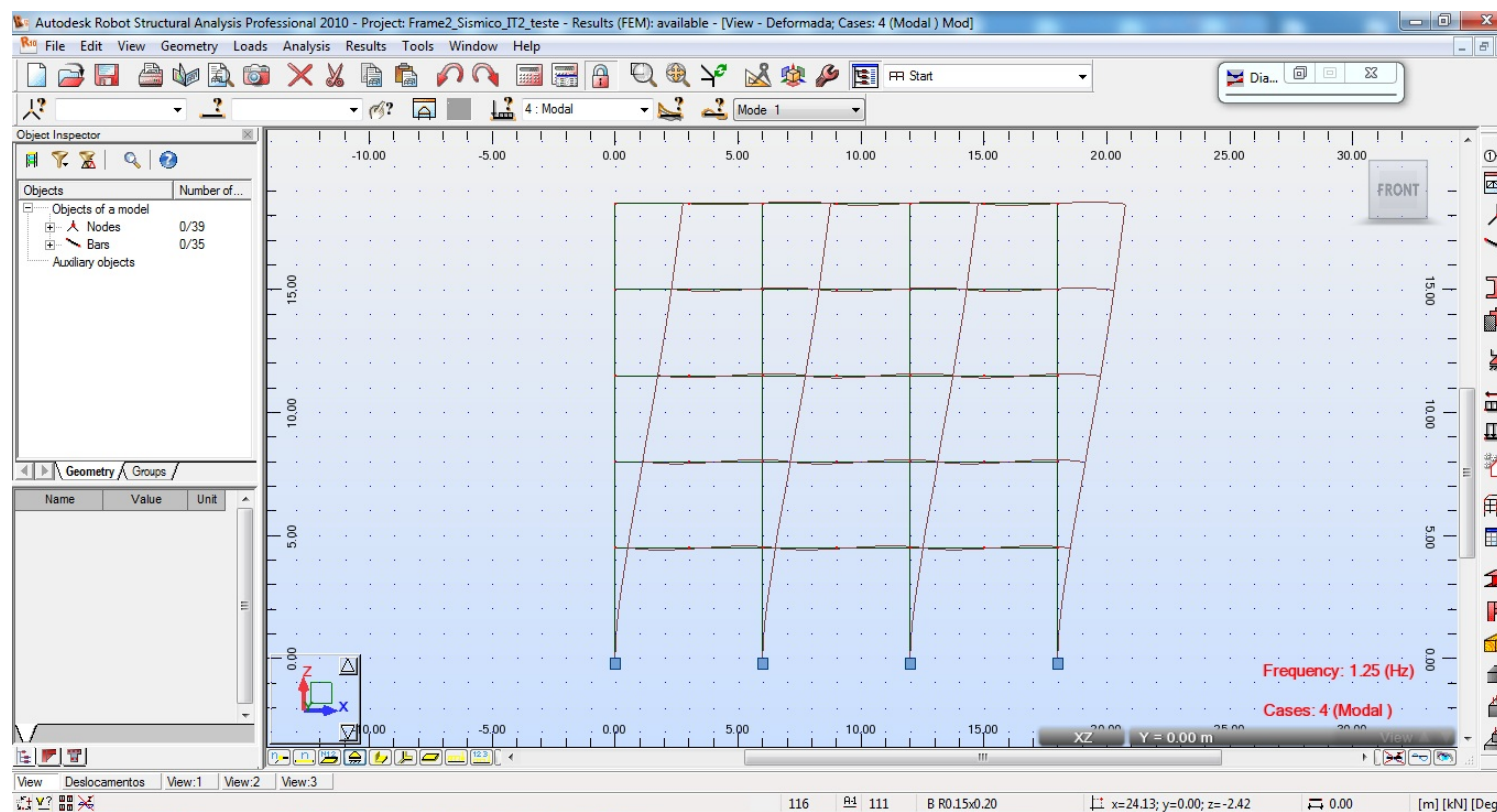


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA – Estrutura Final



Estrutura rigidificada através de um aumento generalizado das secções

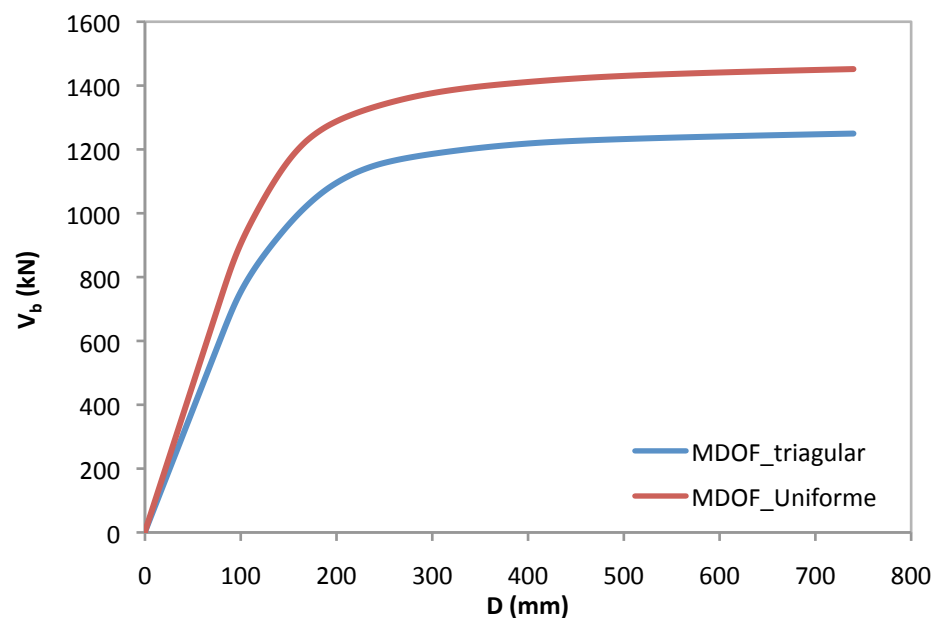


EXEMPLO DE APLICAÇÃO

3. ANÁLISE *PUSHOVER*

As análises *Pushover* foram efectuadas com um padrão uniforme e com um padrão de forças proporcional à massa e à configuração do primeiro modo de vibração

Curvas de Capacidade Resistente





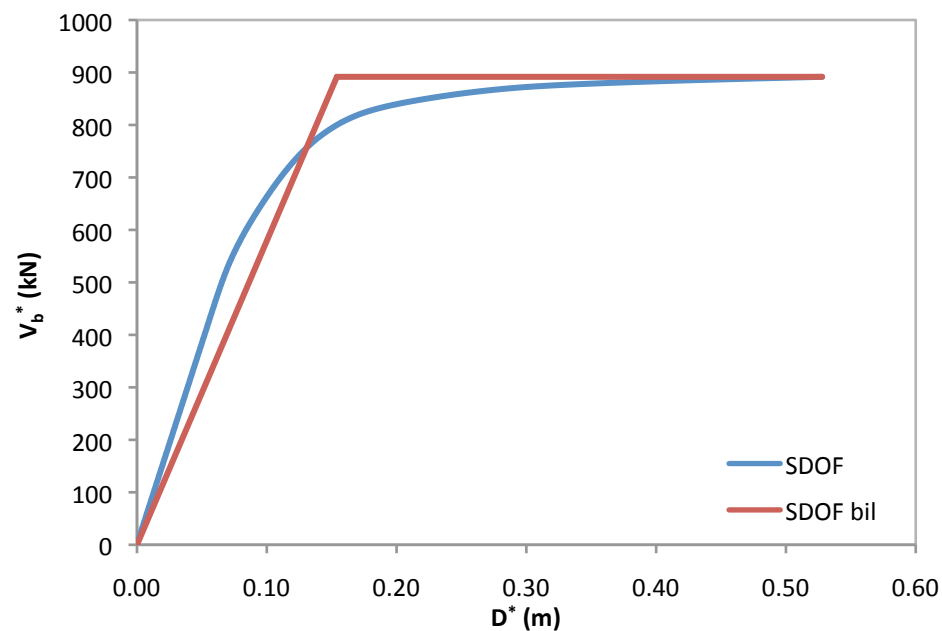
EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE **1GL** EQUIVALENTE

$$m^* = \sum m_i \phi_i^2 = 130,58$$

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \phi_i^2} = 1,401$$

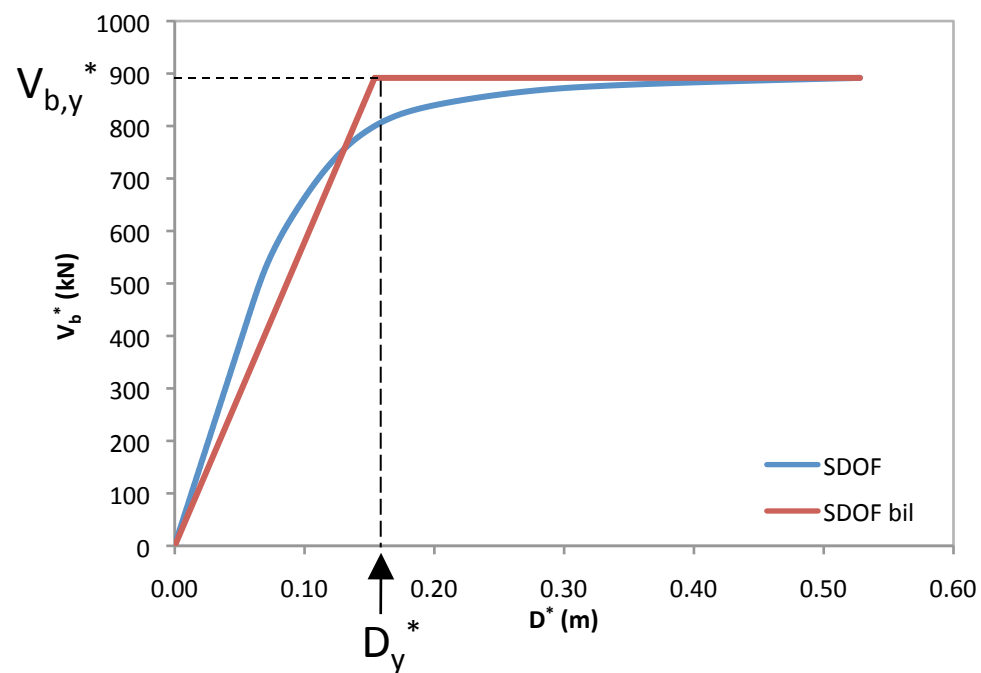
$$V_b^* = \frac{V_b}{\Gamma} \quad D^* = \frac{D}{\Gamma}$$





EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE 1GL EQUIVALENTE



$$V_{b,y}^* = 891,7 \text{ kN}$$

$$D_y^* = 0,154 \text{ m}$$

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* D_y^*}{V_{b,y}^*}} = 0,944 \text{ seg}$$

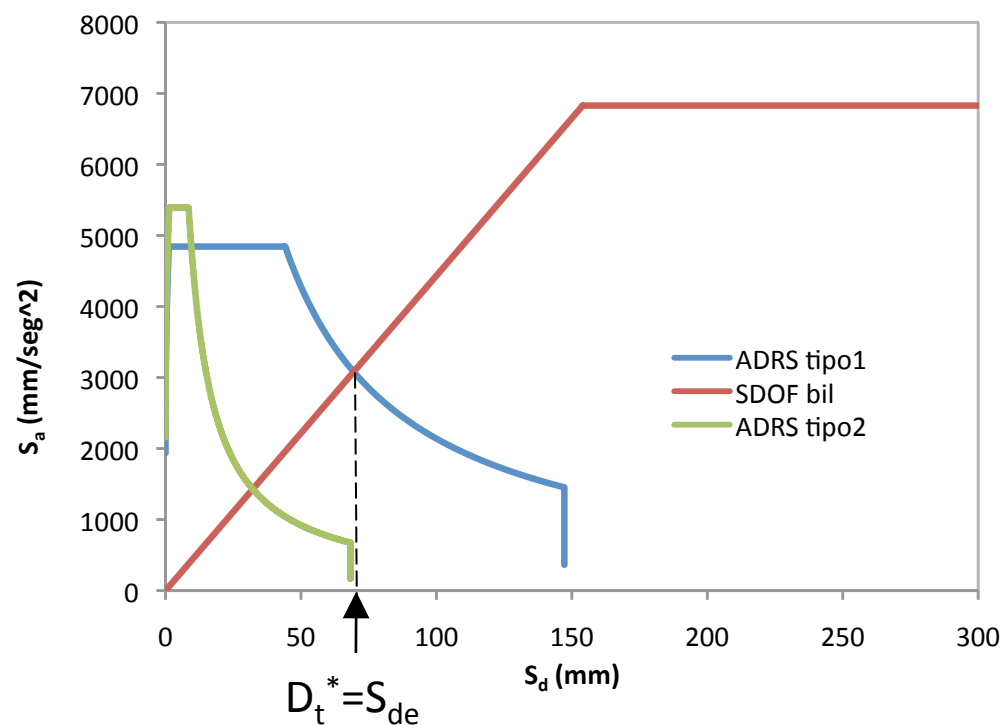


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

5. DESEMPENHO SÍSMICO DO SISTEMA 1GL



$$D_t^* = 0,07 \text{ m}$$

6. DESEMPENHO SÍSMICO DO SISTEMA nGL

$$D_t = \Gamma D_t^* = 0,0974 \text{ m}$$

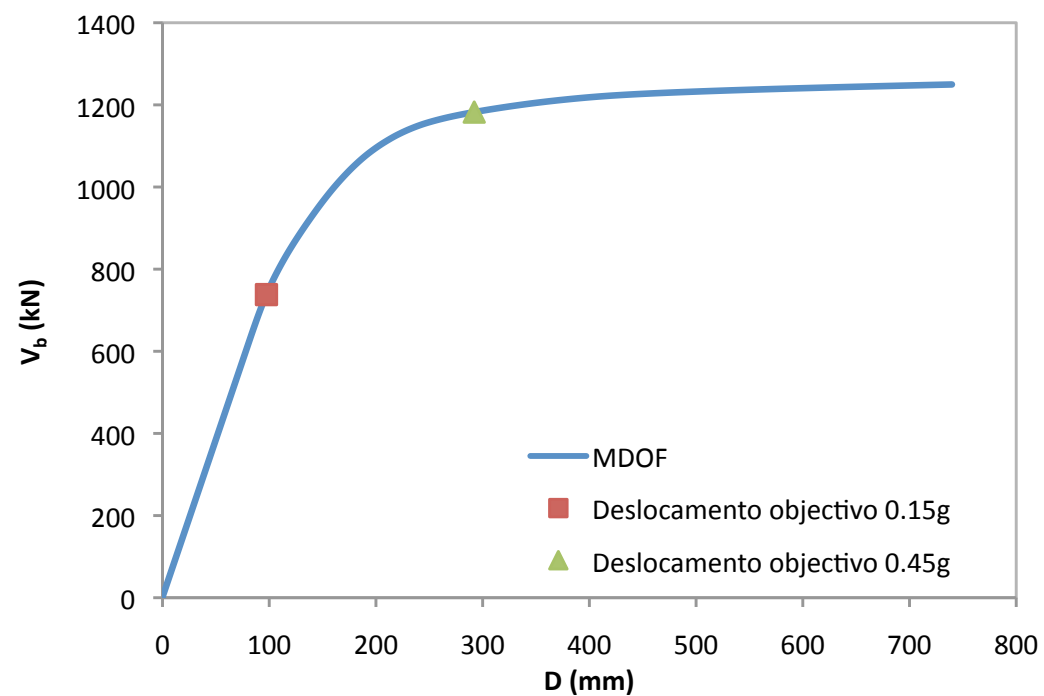


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

DESLOCAMENTO OBJECTIVO DO PÓRTICO PARA 0,15g E 0,45g



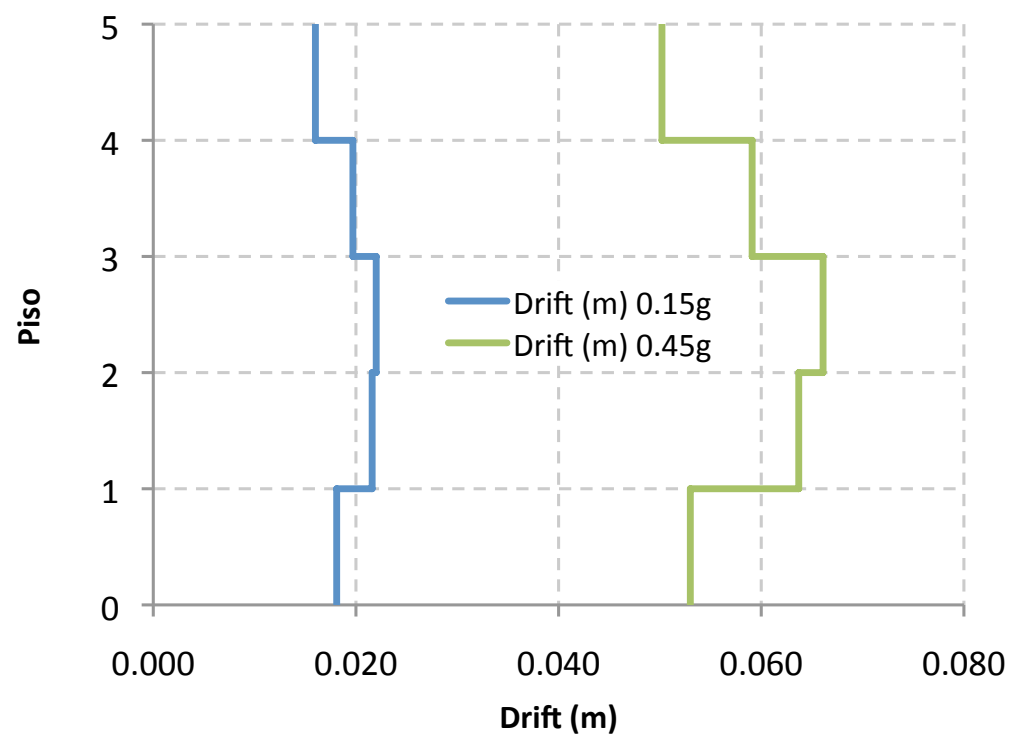


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

AVALIAÇÃO SÍSMICA – Deslocamentos Relativos entre pisos



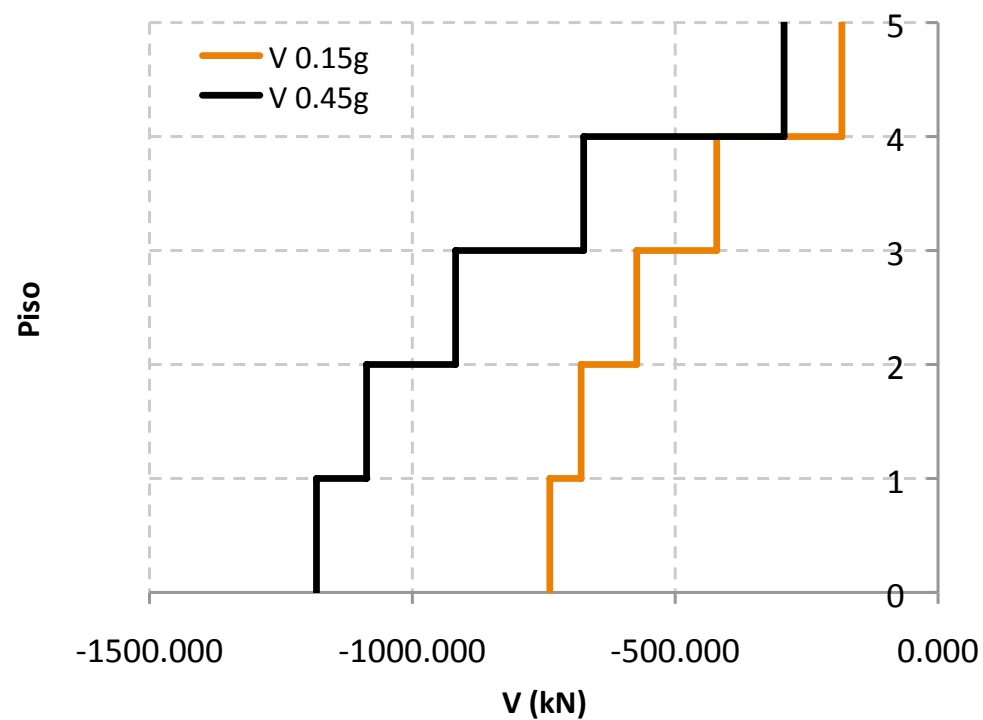


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

AVALIAÇÃO SÍSMICA – Esforço Transverso



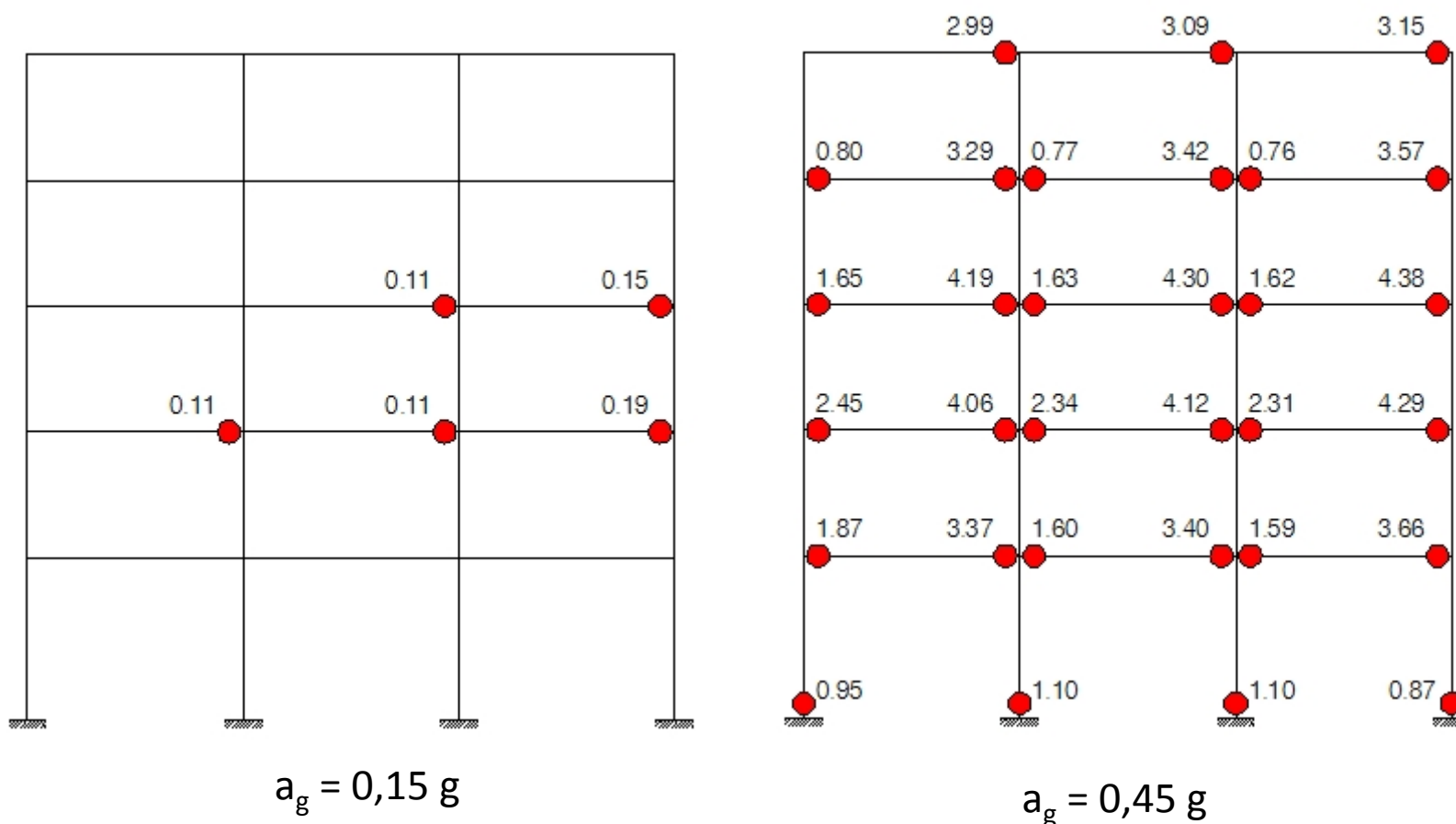


www.cmm.pt



EXEMPLO DE APLICAÇÃO

AVALIAÇÃO SÍSMICA – Rotações não lineares



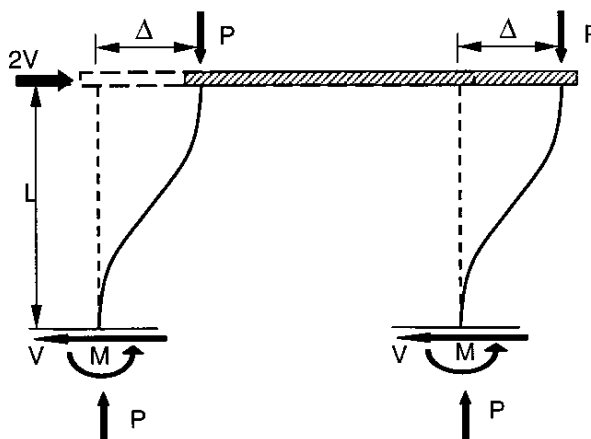


www.cmm.pt



EFEITOS P- Δ

EFEITOS P- Δ sistema 1GL – Comparação do EC8 e da norma Americana



- ☐ Nos regulamentos de dimensionamento a consideração na análise dos efeitos P- Δ é baseada no cálculo do **coeficiente θ de estabilidade por piso**
- ☐ Se $\theta < 0,1$ então P- Δ pode ser **desprezado**. Se $0,1 < \theta < 0,2$ então P- Δ tem que ser **considerado** $[1/(1-\theta)]$

(by Peres e Castro, 2010)



www.cmm.pt



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ nos regulamentos – Coeficiente de Estabilidade no EC8

$$\theta = \frac{P_{tot} \times d_r}{V_{tot} \times h}$$

P_{tot} : Carga vertical cumulativa nos pilares do piso

V_{tot} : Esforço transversal de dimensionamento do piso

h : Altura do piso

d_r : Deslocamento relativo inter-pisos

Deslocamento relativo inter-pisos → baseado na regra de **Igualdade de Deslocamento**: $d_s = q \times d_e$

$$\theta = \frac{P_{tot} \times (q \times d_e)}{V_{tot} \times h} = \frac{P_{tot} \times d_e}{V_{tot} \times h} \times q$$

(by Peres e Castro, 2010)



www.cmm.pt



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ nos regulamentos – Coeficiente de Estabilidade no NEHPR

$$\theta = \frac{P_{tot} \times \Delta \times I}{V_{tot} \times h \times C_d}$$

P_{tot} : Carga vertical cumulativa nos pilares do piso

V_{tot} : Esforço transversal de dimensionamento do piso

h : Altura do piso

Δ : Deslocamento de dimensionamento

I : Factor de importância

C_d : Factor de amplificação

Deslocamento (Δ) → definido multiplicando o deslocamento por um factor de amplificação (C_d) → $\delta = \frac{C_d \times \delta_e}{I}$, onde δ_e é deslocamento elástico

$$\theta = \frac{P_{tot} \times \frac{C_d \times \delta_e}{I} \times I}{V_{tot} \times h_s \times C_d} = \frac{P_{tot} \times \delta_e}{V_{tot} \times h_s}$$

(by Peres e Castro, 2010)



EFEITOS P-Δ

EFEITOS P-Δ nos regulamentos – Rigidez inicial e secante por piso

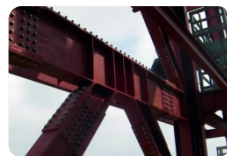
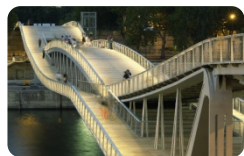
•EC8

$$\theta = \frac{P_{tot} \times d_e}{V_{tot} \times h} \times q = \frac{P_{tot}}{\left(\frac{V_{tot}}{d_e \times q} \right) \times h} = \frac{P_{tot}}{\left(\frac{K_{el}}{q} \right) \times h} = \frac{P_{tot}}{K_{sec} \times h}$$

•NEHRP

$$\theta = \frac{P_{tot} \times \delta_e}{V_{tot} \times h} = \frac{P_{tot}}{\left(\frac{V_{tot}}{\delta_e} \right) \times h} = \frac{P_{tot}}{K_{el} \times h}$$

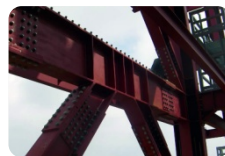
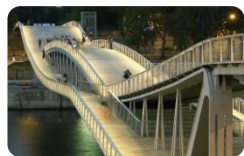
(by Peres e Castro, 2010)



EFEITOS P-Δ

(by Peres e Castro, 2010)

Numero de Pisos	Intensidade Sísmica	Valores máximos aceites para θ	
5 Pisos (3 vãos)	PGA = 0.3g	$\theta_{NEHRP} < 0.1; \theta_{EC8} > 0.20$	Caso 1: 5 S_ NEHRP_0.3g
		$0.10 < \theta_{EC8} < 0.20$	Caso 2: 5 S_ EC8<0.2_0.3g
		$\theta_{EC8} < 0.10$	Caso 3: 5 S_ EC8<0.1_0.3g
	PGA = 0.4g	$\theta_{NEHRP} < 0.1; \theta_{EC8} > 0.20$	Caso 4: 5 S_ NEHRP_0.4g
		$0.10 < \theta_{EC8} < 0.20$	Caso 5: 5 S_ EC8<0.2_0.4g
		$\theta_{EC8} < 0.10$	Caso 6: 5 S_ EC8<0.1_0.4g
8 Pisos (3 vãos)	PGA = 0.3g	$\theta_{NEHRP} < 0.1; \theta_{EC8} > 0.20$	Caso 7: 8 S_ NEHRP_0.3g
		$0.10 < \theta_{EC8} < 0.20$	Caso 8: 8 S_ EC8<0.2_0.3g
		$\theta_{EC8} < 0.10$	Caso 9: 8 S_ EC8<0.1_0.3g

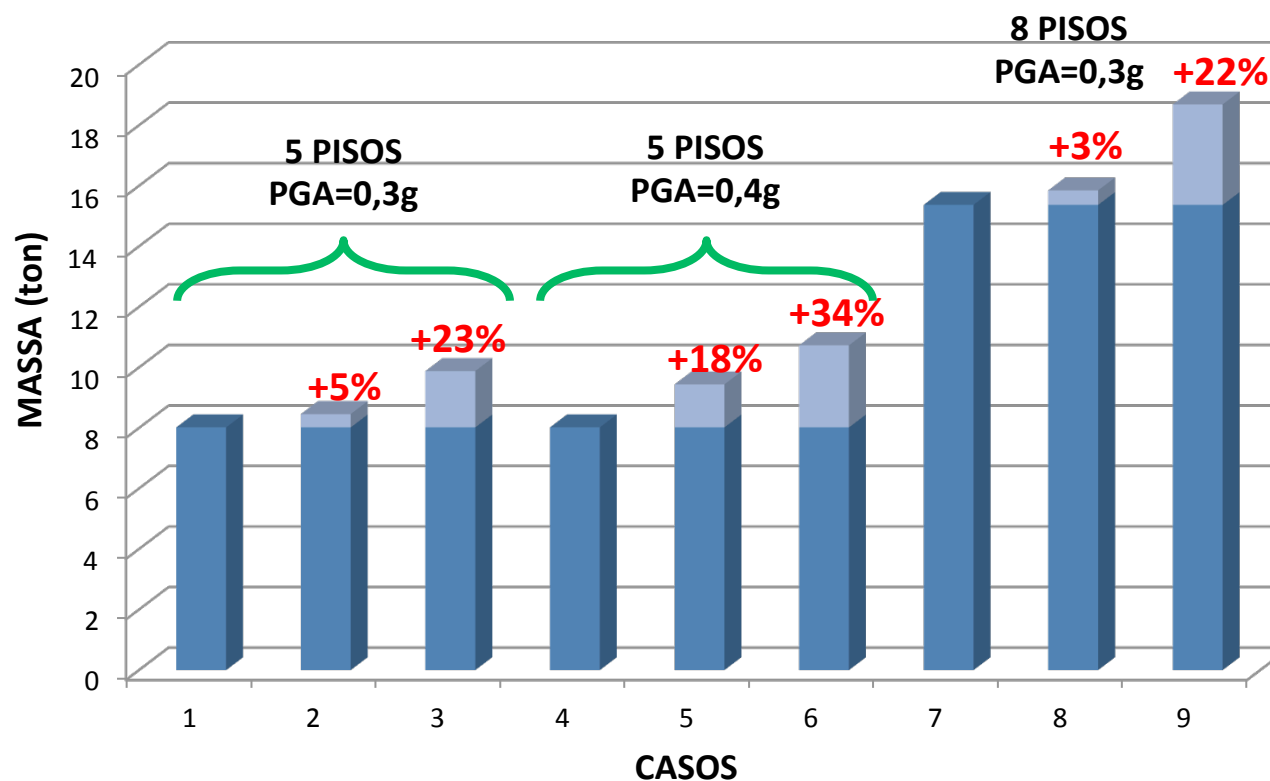


www.cmm.pt

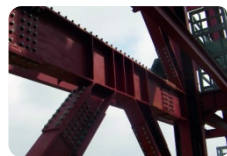
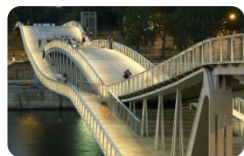


EFEITOS P- Δ

ESTUDO PARAMÉTRICO – Comparação de Massas



(by Peres e Castro, 2010)



www.cmm.pt



Curso de Formação:

Dimensionamento Sísmico de Estruturas Metálicas

Lisboa, 25 e 26 de Março de 2011



Rita Bento